

アワビ増殖場が周辺海域の低次生産に与える影響に関する

基礎調査

中央水産研究所
海区水産業研究部
福田雅明

調査実施年度 平成12年～14年

緒言

近年、アワビ等を中心とした沿岸磯根資源の減少が著しく、その対策として増殖場の造成が盛んに行われている。アワビ、ウニ等の増殖場は、保育礁、生育礁の造成とともに餌料海藻となるアラメ・カジメ等を繁茂させるための定着林を配置するのが一般的である¹⁾。これらの増殖場は当然のことながら対象とする生物の増殖を促し、漁獲量の増加を期待して造成するが、アラメ・カジメ等の大型褐藻類による一次生産力は高く、藻体から脱落した側葉もしくは海底基盤から流出した藻体（寄り藻）が有機物を供給して近隣海域の生産性向上に役立つことが期待される。海中林で生産された大型藻類由来の有機物が底生生態系に与える影響に関する知見は極めて少ないが、北太平洋においてコンブ目藻類によって生産された有機物が分解され、これらがベントス等の底生生物の生産のみに役立つだけでなく、魚類や鳥類にまで影響を及ぼしていることが報告されている²⁾。したがって、餌料定着林を持つアワビ等の増殖場造成は対象生物の増殖効果のみならず周辺海域の生産性に極めて重要な影響を与えているはずであるが、現状ではその定量化手法が無いことから、結果的にこの効果は算定されていない。そこで本課題は、アワビ増殖場に繁茂したカジメ等の大型褐藻類起源の有機物が分布する範囲と量を定量化し、増殖場造成が海洋生産の増大に与える副次的な効果を判定するための基礎的な技術を開発することを目的とした。

調査方法

1) 調査手法の概要

近年、海洋中に存在する一次生産者の起源を推定する目的で炭素の安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）を測定する試みがなされている。安定同位体とは自然界に存在する質量数の異なる同一元素で、環境中にはほぼ一定の割合で存在しているが、生物体内で代謝経路にはいと選択的に分別され、(1)植物では炭素固定の方法によって同位体比が決定され、植物プランクトン、大型藻類ではそれぞれ異なる値をとる、(2)動物は餌料の同位体比をほぼ受け継ぐ、という性質を持っている。このことから、藻場及び周辺域に分布する一次消費者（動物）の炭素安定同位体比を測定し、その値がカジメの炭素安定同位体比と類似していれば、カジメ由来の有機物が分布する範囲を特定することが可能となる。そこで本課題では、この様な手法を応用してアワビ増殖場とその周辺海域にアサリをカゴに入れて移植し、アサリの取り込んだ有機物の起源を安定同位体比によって推定することによって、大型藻類起源と思われる有機物の分布範囲を推定することを試みた。また、移植したアサリのDNA/RNA比を測定して、分布する有機物量を定量的に評価することの可能性を検討した。

2) 調査海域

調査対象実験海域として、横須賀市長井漁業協同組合の設置したアワビ増殖場を選定した(図1)。本増殖場は長井漁業協同組合がアワビの増殖を目的として設置し、禁漁区に設定している。これは鋼材で組んだ枠組みに転石を充填した構造になっており、砂底域に露出した岩盤上に3器設置している。



図1 調査地点

3) 予備実験

アサリをカゴに入れて自然海域へ移植が可能かどうか、また安定同位体比による有機炭素源の推定が可能かどうか試行する目的で、増殖場とその周辺砂底域及びアマモ場にステンレス製のカゴを設置し、人工餌料で馴致飼育したアサリを移植した。実験に供したアサリは千葉県の漁業協同組合より購入し、人工餌料(商品名: マリンアルファ)によって約1カ月間、流水馴致飼育を行った。アサリの移植はステンレス製カゴ(20cm×20cm×60cmで内部は4部屋)を用いた。移植実験はアマモ場(タチアマモの小群落)とカジメ場(アワビ増殖場)にカゴを設置した移植実験1(6月18日に移植して7月31日に全て回収)と、カジメ場及びその周辺4カ所(カジメ場の近傍30~70mに3点、やや離れた地点350mに1点: 図2)の砂底域にカゴを設置した移植実験2(10月18日から翌年1月4~16日)の2回行った。安定同位体比の分析にはアサリの足部と水管を用い、ホモジネイト作成後、脱脂処理を行った後に乾燥粉末試料を作成した。分析に供したサンプルは各移植地点ごとに5個体とした。安定同位体測定は元素分析計(Fisons EA 1108)と質量分析計(Finnigan MAT 252)を接続したシステムによった。

4) 本実験

炭素の安定同位体比($\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)から増殖場の内部と周辺域の有機炭素源を比較して炭素源の分布範囲を推定するために、既知の餌料で飼育したアサリを増殖場及び周辺砂底域に移植し、経時的に回収を行い炭素の安定同位体比を測定した。実験に供したアサリは上記3)と同様に馴致飼育を行い、ステンレス製のカゴに収容して移植した。移植した地点は増殖場の内部及び周辺の砂底域(増殖場中心部をとる北東~南西方向に調査ラインを

設定し、40m 間隔を基本とする定点を設定)に 5 定点を設定してアサリを移植した(図 2)。アサリは毎月 1 回スキューバ潜水によって回収した。安定同位体比の測定に供したアサリは各地点・各採集日ごとに 10 個体とした。また、増殖場内部と周辺砂底域に分布する有機炭素量を推定するために、安定同位体比分析に使用したアサリサンプルを用いて核酸比 (RNA/DNA) を分析した。RNA/DNA の分析は 12 月 27 日のサンプルについてのみ行い各地点 5 個体ずつとした。さらに、核酸比からアサリが利用した有機物の量を推定する目的で、人工餌料を用いて餌料量を変え (0、0.5、1.0、2.0mg/個体/日)、21 日間アサリの飼育実験を行った。各餌料試験区には 10 個体収容し、核酸の分析には 7 個体用いた。飼育条件は明暗周期を 12 : 12 時間とし、水温は、20 度に設定した恒温室内に小型水槽 (60 l の角形水槽) を設置することによって設定した。海水は前日から汲み置いて恒温室内にて水温を一定にした濾過海水を毎日全量交換した。

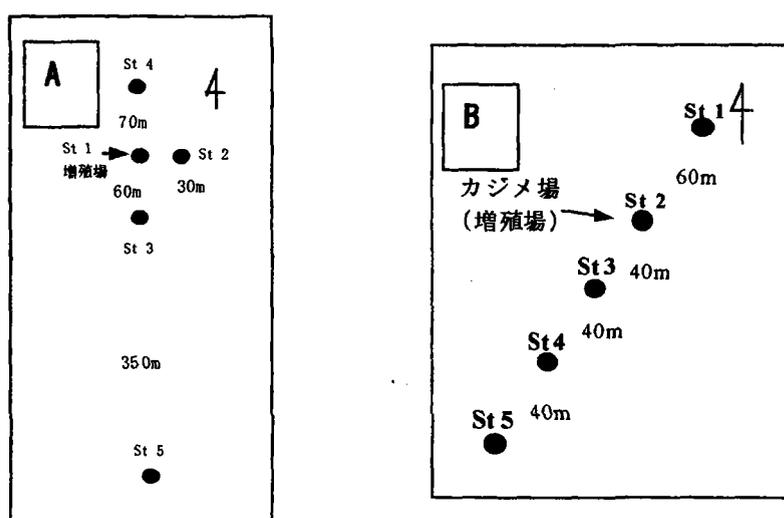


図 2 増殖場及び周辺砂浜域に設置した移植カゴの概念図 (A : 予備実験、B : 本実験)

増殖場に繁茂するカジメ、増殖場周辺に分布するプランクトン等のネット採集で得られる粒状懸濁物ならびにセジメントトラップで採取される沈降物の安定同位体比を測定して、増殖場周辺に分布する有機物を検討した。

増殖場に繁茂するカジメはスキューバ潜水によって採集し、葉体を葉先と葉中の 2 カ所及び茎に分けて安定同位体比を分析した。さらに、増殖場及び近隣の砂浜域にセジメントトラップを設置し、5 日間にわたり沈降物を採集して底層に分布する有機物の安定同位体比を分析した。セジメントトラップは、口径 74mm の 2 リットルポリビンを 4 基接続した構造となっており、2002 年 12 月 5 日より 9 日まで St 1、St 2 及び St 3 の海底に設置した。また、増殖場直上に分布する粒状有機物 (POM) を 2003 年 1 月 6 日及び 14 日にプランクトンネット (100 ミクロン目合) で採集し、粒状有機物の安定同位体比を分析した。プランクトンネットの曳網は、海底直上及び水深 3 m 並びに表層で行った。沈降物及び粒状有機物 (POM) は濾過によって濾紙上に集め、炭酸カルシウムを除去する目的で塩酸処理 (1N) を行った。安定同位体比の分析は上述の 3) に準じて行った。

調査結果

1) 予備実験の結果

移植実験1：カジメ場とアマモ場に移植したアサリの炭素安定同位体比は、移植後1週間程度はほとんど差が認められなかったが、3週間後にはカジメ場に移植したアサリで $-14.2 \pm 0.23\text{‰}$ (平均値 \pm SD、以下同じ)、アマモ場のそれは $-13.8 \pm 0.19\text{‰}$ となり、カジメ場の方が安定同位体比が低い値をとるようになった(図3)。7月9日の炭素安定同位体比はアマモ場とカジメ場では有為な差がみられた ($p < 0.01$)。また、カジメ場中央部と縁辺部に移植したアサリの炭素安定同位体比は極めて類似した値をとり ($p = 0.88$)、増殖場内部で生産された有機炭素が周辺の砂底域にまで分布している可能性が示唆された。

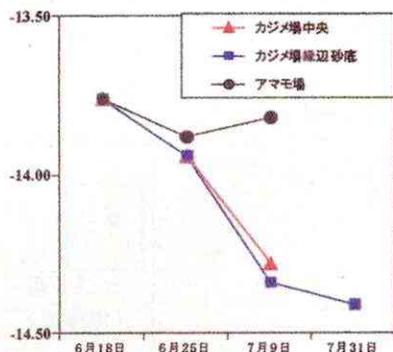


図3 カジメ場及びアマモ場に移植したアサリの炭素安定同位体比

移植実験2：アサリを移植した後の炭素安定同位体比の経時変化をみると、約1カ月間は移植場所にかかわらず類似した値をとるが、2か月後には移植地点間の一部では炭素の平均安定同位体比に差が生じた(図4)。炭素安定同位体比の値はカジメ場中心部(St1)で最も高い値をとり ($-13.9 \pm 0.12\text{‰}$)、St2で $-14.0 \pm 0.29\text{‰}$ 、St3で $-14.2 \pm 0.25\text{‰}$ 、St4で $-14.6 \pm 0.11\text{‰}$ 、St5で $-14.3 \pm 0.13\text{‰}$ であった。この結果について平均値の多重比較検定を行った結果(表1)、カジメ場中央部に近い点(St2)はカジメ場内部と有意な差が認められず、中央部から約60~70m離れた2点(St3、St4)及び約350m離れた地点(St5)では有意差がみられた。

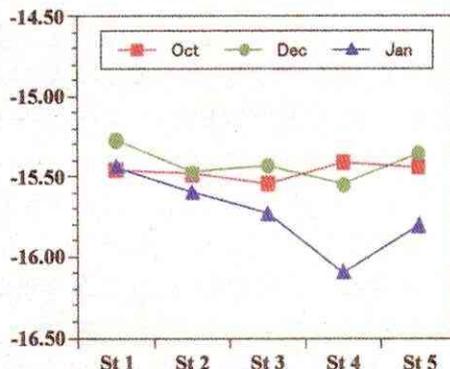


図4 移植したアサリの月別・地点別安定同位体比

表 1 安定同位体比の地点間の比較 (Fisher の PSLD)

	St 1	St 2	St 3	St 4	St 5
St 1		NS	**	**	*
St 2			NS	**	NS
St 3				**	NS
St 4					*

*:p<0.05**:p<0.01

また、移植後 2 カ月を経たアサリについて核酸比 (RNA/DNA) を分析した結果 (1 月のサンプル)、増殖場及び近隣の砂底域 (距離約 30m) で高い値を示し、その他は増殖場から離れた点ほど低い値を示した (図 5)。しかし、これらの平均値には有意な差は認められなかった。

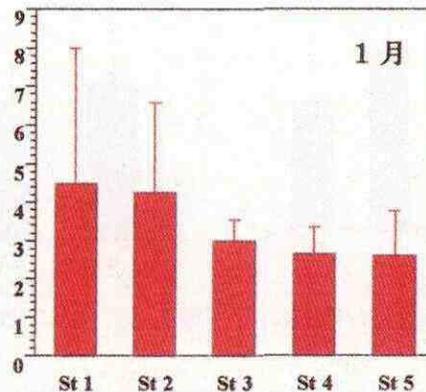


図 5 アサリ筋肉の地点別 RNA/DNA 比

2) 本実験の結果

アサリを移植した後の炭素安定同位体比は移植地点間、移植期間に関わらずほぼ一定の値 (-14.0~-14.5‰) をとり、増殖場周辺の 100m 程度のスケールでは差の無いことが分かった (図 6)。予備実験では 40~50m 増殖場から離れるとアサリの安定同位体比に差がみられたが、本実験ではこのような差はみられなかった。この原因は不明であるが、本実験の期間中は予備実験期間中と比較して時化が多く (日平均風速が予備実験の 2 倍以上)、海水の水平混合によって有機物の分布が均一になった可能性がある。

一方、移植したアサリの核酸比 (RNA/DNA) は増殖場から約 80m 離れた地点 (St 4) で最も高く、南北方向に緩やかに低下する傾向がみられた (図 7)。一方、移植したアサリの RNA/DNA 比を指標として、移植場所の有機物分布量を推定するために飼育実験を行ったが、餌料量を変えて飼育したアサリの核酸比は無投餌区が最も高い値をとり、投餌量の多い個体ほど低い値をとった (図 8)。多くの生物では摂餌量と RNA/DNA 比の間に直線関係が成り立つことが知られており、この関係式から天然個体の RNA/DNA を知って摂餌量の推定する試みがなされている³⁾。しかし、本課題ではこの関係式が得られなかったので、移植したアサリの核酸比から移植地点に分布する有機物量を推定することはできなかった。

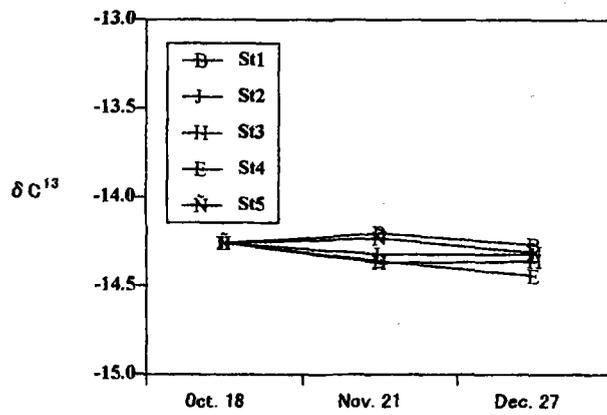


図6 月別・移植地点別のアサリ炭素安定同位体比

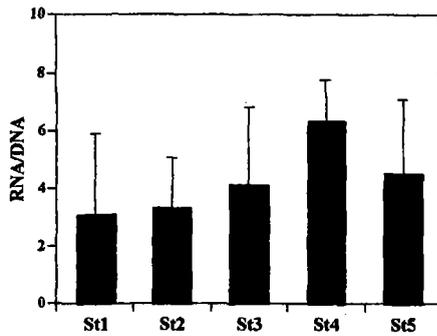


図7 移植したアサリの地点別 RNA/DNA 比

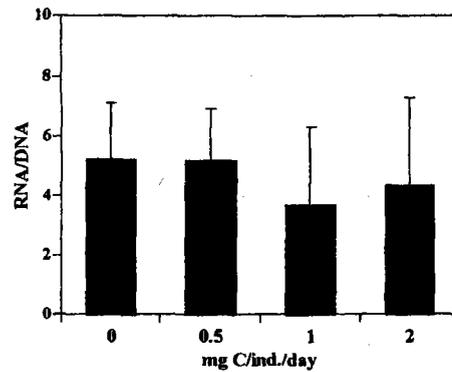


図8 アサリの RNA/DNA 比と投餌量の関係

カジメの炭素安定同位体比は-15.2~-16.2‰の範囲にあり(図9)、葉先がもっとも低い値をとり、ついで茎と葉中の順であった。カジメの炭素安定同位体比はアサリのそれと比較して約1.0‰高い値となった。通常、炭素の安定同位体比は食地位が1段階上がると1‰程度高くなることから知られているので、カジメ由来の炭素源がアサリに利用されている可能性が示唆された。

100ミクロン目合いのプランクトンネットによって採集された粒状有機物(POM)は、1月6日に採集されたサンプル(-19.2±0.83‰)と1月14日のサンプル(-21.6±0.23‰)で炭素安定同位体比の値がかなり異なっており、1月6日の方が有意に高い値を示した(p<0.001)。また、1月6日では同日採集サンプルでも採集深度によって炭素安定同位体比に差がみられ(p<0.001)、表層、底層、中層の順に高い値をとった。

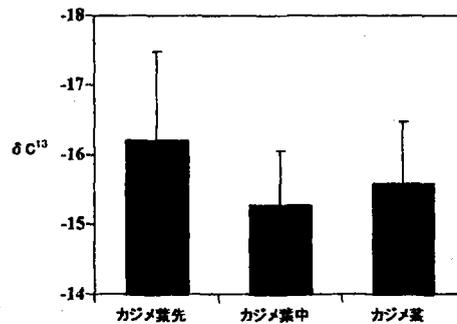


図9 カジメの安定同位体比

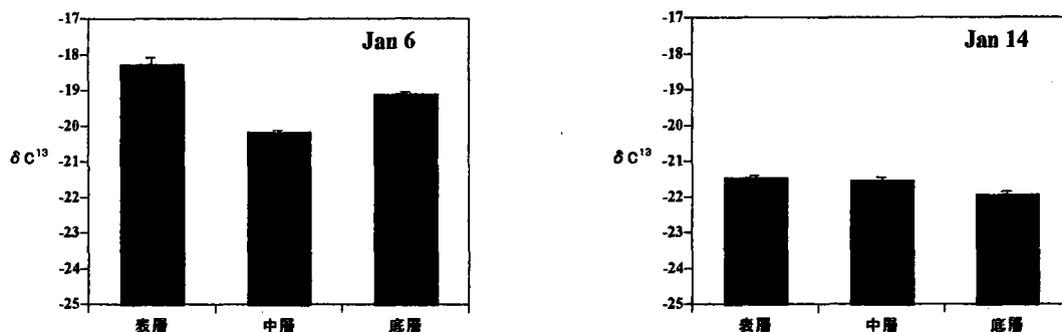


図 10 アワビ増殖場において採集された粒状有機物の炭素安定同位体比

図 11 に増殖場周辺に設置したセジメントトラップによって採集された沈降物の炭素安定同位体比を示した。沈降物の炭素安定同位体比は-18.3~-18.8‰の間にあり、増殖場内部の点 (St 2) でもっとも高い値がみられ、南西側 40m の地点 (St 3) で最も低い値が得られた。これら採集地点間における炭素安定同位体比は統計的に有意な差であった ($p < 0.01$)。

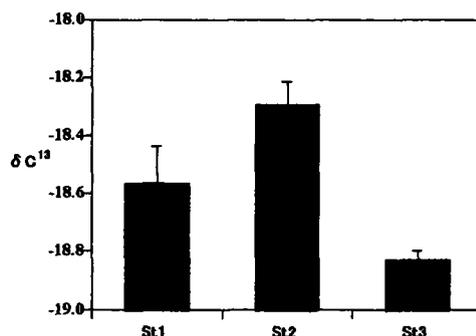


図 11 アワビ増殖場及び周辺域の海底において採集された沈降物の炭素安定同位体比

考察

アサリの食性に関しては不明な点が多い。小池・中島⁴⁾、小池ら⁵⁾はアサリの餌料として底生の付着珪藻の重要性を指摘しているものの、黒倉ら⁶⁾、伊藤ら⁷⁾、沼口⁸⁾はアサリ漁場で採取された底泥に含まれるデトライタスによって飼育実験を行い、その餌料としての効果を明らかにしている。したがって、アサリはデトライタスも餌料として利用している可能性が強く示唆されている。本課題ではアサリを移植することによって、アサリ筋肉中の炭素安定同位体の値から、アワビ増殖場で生産されたカジメ等海中林由来のデトライタスの分布を推定することを試みた。予備実験において、アマモ場とカジメ場に移植したアサリ筋肉の安定同位体比に有意な差のあることを示し、これら両者の藻場には異なる有機物が分布している可能性を示唆した。本課題の測定からカジメの炭素安定同位体比は-15.2~-16.2 の値をとることが明らかとなったが、この値は一般的なアマモの値である-10~-13‰^{4), 9)}と比較して低い値である。一般的に捕食者の炭素安定同位体比は餌料のそれと比較して約 1%程度高い値をとることが知られているので、カジメ場に移植したア

サリ筋肉の同位体比 -14.3% 及びアマモ場におけるアサリ筋肉の安定同位体比 -13.8% はそれぞれ一次生産者の値に近づいていることが示唆された。このことから、アサリを移植することによって、移植場に分布する炭素有機物源を推定する手法は基本的に可能であると考えられる。

予備実験における移植実験2では、カジメ場及び近傍とその周辺砂浜域では異なる安定同位体比を示し、カジメ場では最も高い値 (-13.9%) であった。この値は夏季の予備実験(アマモ場とカジメ場)におけるアマモ場に移植したアサリ筋肉に類似した値であった。一次生産者の炭素安定同位体比は種類による相違以外に水温等によっても異なることが知られており¹⁰⁾、明瞭な季節性及び緯度傾斜の存在が指摘されている。したがって、この値がアマモ場の影響を受けているとは考えにくく、他の要因によるものと思われる。本実験ではプランクトンネットで採集した粒状有機物(POM)及びセジメントトラップで採集した沈降物についても炭素安定同位体比を分析した。粒状有機物の炭素安定同位体比は採集日(1月6日及び1月14日)によって有意に異なっていた。1月6日の採集中、スキューバ潜水による観察では海藻の切れ端等の懸濁物が多く、前日まで続いた時化によってカジメ等の葉体がちぎれて海水中に再懸濁されたものと考えられた。実際、POMのサンプルは葉緑体と思われる物質で暗緑色を呈していた。これに対して、1月14日は静穏な海況が続いた後で、潜水中に透明度が比較的良好であることを確認しており、サンプルの大半は動物プランクトンで占められていた。両日のサンプルにみられる安定同位体比は、1月6日では -19.2% で1月14日の -21.6% と比較して高い値を示していた。一般に、浮遊珪藻を中心とした植物プランクトンの炭素安定同位体比は -20% 程度であることが知られており¹¹⁾、このことから動物プランクトンが主体となった1月14日のサンプルは、植物プランクトンを摂餌している動物プランクトンが粒状有機物の大部分を占め、1月6日のサンプルはこれにカジメ等の藻類の切れ端が含まれて高い値となったと考えられる。いずれにせよ、本課題で行ったような微細な空間スケールで安定同位体比をみた場合、時化や凧という海況が有機物の分布を大きく左右していることが強く示唆された。セジメントトラップによって得られた沈降物の炭素安定同位体比は $-18.3\sim-18.8\%$ の範囲にあり、1月6日のPOMの値よりさらに高い値となった。これは、植物プランクトンや動物プランクトンの死骸及び排泄物等を起源とする有機物にカジメ等の藻類を起源とする有機物が混合され沈降物となって底層に積もったもので、底層のデトライタスはカジメ等の藻類起源の比率が高くなると判断される。しかし、この安定同位体比の値は移植したアサリ筋肉の同位体比である $-14.0\sim-14.5\%$ と比べるとかなり低い値であり、移植したアサリは必ずしも沈降物が起源となったデトライタスを主要な餌料として利用していないことが窺われる。

一般に、炭素の安定同位体比とともに窒素の安定同位体比を分析し、両者の値を同一グラフ上にプロットして(C-Nマップ)食物関係を検討する方法がとられている。これは、窒素の安定同位体比 $\delta^{15}\text{N}$ は同化の過程で 3% 程度増加する性質を利用したもので、 $\delta^{13}\text{C}$ によって食物網の出発点となる一次生産者と $\delta^{15}\text{N}$ による食地位を一元的に表し、食物網の構造を視覚化したものである。本課題では、各サンプルについて副次的に窒素安定同位体比を測定した。そこで、増殖場周辺に存在する生物及び有機物の炭素及び窒素の安定同位体比分析結果をC-Nマップ(炭素源と食段階の概観を示す)上に図示すると(図12)、粒状有機物と沈降物の炭素同位体比は比較的低い値を示し、植物プランクトンの影響が示唆された。一方、移植したアサリの炭素同位体比はアワビ、サザエと類似した値をとり、窒素安定同位体比の値から判断して食地位はこれらより高いことが示唆された。また、移植したアサリの炭素安定同位体比はカジメ及びカジメのちぎれ藻の直上に位置していること

から、これらを起源とした有機物を利用していることが示唆された。

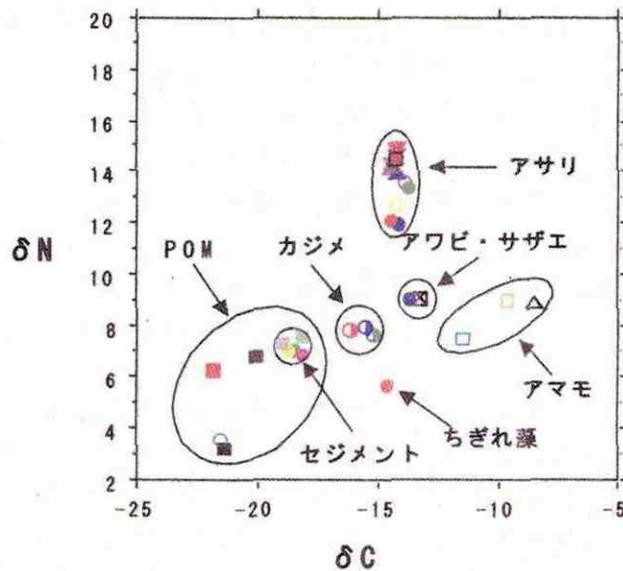


図 12 アワビ増殖場周辺で採集された有機物の C-N マップ

しかし、一方でアサリは底生の付着珪藻類を餌料として利用していることが報告されており^{4), 5)}、小池・中島⁴⁾は底生珪藻の炭素安定同位体比は-16~-18‰にあることを報告している。これらの値は移植したアサリの安定同位体比と比較してやや低い値であるが、小池・中島⁴⁾は底生珪藻とデトライタスを含む値で測定していること、大西洋から北海では底層の珪藻の炭素安定同位体比が-14~-15‰であることが報告されている¹²⁾ことから、本課題で移植したアサリが底層の珪藻を主要餌料としていた可能性を否定できない。したがって、海中林を伴う漁場造成が副次的に周辺海域の生物生産に与える影響を評価するためには、今後は底層の付着珪藻を視野にいれて検討を加える必要がある。

本課題では、カジメ由来の有機物の分布を推定するとともに、移植したアサリの核酸比からその量的評価を可能とする方法を試みた。しかし、移植後の核酸比は有機物の分布に傾斜のあることを示すような値が得られたが、飼育実験によってこの値をアサリが取り入れた有機物量に変換するための関係式に一般化することができなかった。この原因は不明であるが、一般に貝類では摂餌量を評価する上で核酸比よりもグリコーゲンの蓄積量の方が利用されているので、グリコーゲン等の物質による関係式を検討することも今後の課題であろう。

摘 要

- 1) アワビ増殖場とその周辺海域にアサリをカゴに入れて移植し、アサリの取り込んだ有機物の起源を安定同位体比によって推定することによって、大型藻類起源と思われる有機物の分布範囲を推定することを試みた。
- 2) カジメ場やアマモ場にアサリを移植して、1カ月程度経た後に回収して筋肉の炭素安定同位体比を分析することによって、それぞれの藻場に分布する有機物の質的評価が

可能であった。

- 3) アサリを移植し、その炭素安定同位体比を分析することによって、カジメ由来の有機物の分布範囲が特定できる可能性が示唆されたものの、数百メートルの空間スケールに分布する有機物は時化や凧などの海況に大きく影響を受けるので、2年間の調査では分布範囲を特定できる場合とできない場合があった。
- 4) 調査を行ったアワビ増殖場に分布する有機物のうち、粒状有機物は海況によってかなり変動し、時化が続くとカジメ等藻類由来の有機物が混合されるが、凧の場合は動物プランクトンが多かった。
- 5) 底層に沈降した有機物は植物プランクトン及び動物プランクトン由来の有機物が多かったが、粒状有機物と比較するとカジメ等藻類の有機物が多く含まれている可能性が示唆された。
- 6) 移植したアサリ、カジメ、アマモ、アワビ、サザエ、粒状有機物、沈降物をC-Nマップ上にプロットして、移植したアサリの利用した一次生産者を推定すると、それはカジメである可能性が強く示唆されたが、底層の付着珪藻類の可能性も残った。
- 7) したがって、カジメ等の海中林によって生産された有機物の空間的な広がりや、安定同位体比を用いて質的に評価する技術を確立するためには、底層の珪藻類の安定同位体比を知ることが必要である。
- 8) 移植したアサリの核酸比 (RNA/DNA) を分析した結果、移植地点によって異なる値をとることが明らかとなり、有機物の分布に濃淡のあることが示唆されたが、量的な評価を行うことはできなかった。
- 9) アサリの移植法によって海中林等で生産された有機物の分布量を評価するためには、摂餌量を的確に示す物質 (グリコーゲン等) の定量化を検討する必要がある。

引用文献

- 1) 松永 務 1998 : 沿岸の環境圏、フジ・テクノシステム、東京、549-560.
- 2) Duggins, D.O., Simenstad, C.A., Estes, J.A. 1989 : Magnification of secondary production by kelp detritus in coastal marine ecosystems, *Science*, Vol. 245, 170-173.
- 3) Fukuda, M., Sako, H., Shigeta, T., Shibata, R. 2001 : Relationship between growth and biochemical indices in laboratory-reared juvenile Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*), and its application to wild fish, *Mar. Biol.*, 138, 47-55.
- 4) 小池裕子・中島 徹 1989 : 東京湾小櫃川河口干潟の生態系における炭素安定同位体比の分布と季節変動について、*埼玉大学紀要 (自然科学編)*、25、21-34.
- 5) 小池裕子・斉藤 徹・小杉正人・柿野 純 1992 : 東京湾小櫃川河口干潟におけるアサリの食性と貝殻成長、*水産工学*、29、105-112.
- 6) 黒倉 寿・黒田信行・笠原正五郎 1988 : 芦田川河口域におけるアサリの生き残り条件に関する研究、*水産増殖*、35(4)、223-228.
- 7) 伊藤絹子・吉田 晋・鈴木あや子・刈谷貞二 1989 : 超音波を利用した二枚貝類への投餌方法、*水産増殖*、37(4)、241-246.
- 8) 沼口勝之 2001 : アサリ漁場の餌料環境としてのセジメント、*水産工学*、37(3)、209-215.

- 9) 和田英太郎・辻 堯・南川雅男・水谷 広・今泉励子・柄沢亨子 1983 : 大槌川水系における有機物輸送の研究 - 生物地球化学的モデル場の確立-、大槌臨海研究センター報告、9、17-34.
- 10) 和田英太郎 1984 : 生物による炭素・窒素同位体比の変動- 海洋への応用、海洋科学、16、117-123.
- 11) 市川忠史 1998 : 沿岸の環境圏、フジ・テクノシステム、東京、549-560.
- 12) Herman, P.M.J., Middelburg, J.J., Widdows, J., Lucas, C.H., Heip, C.H.R. 2000 : Stable isotopes as trophic traces: combining field sampling and manipulative labelling of food resources for macrobenthos, Mar. Ecol. Prog. Ser., 204, 79-92.